УДК 66.041.001.5:661.487

СТАТИЧЕСКАЯ ТЕПЛОВАЯ МОДЕЛЬ БАРАБАННОЙ ПЕЧИ

В.Г. Букреев, А.В. Цхе

Томский политехнический университет
E-mail: alex414@mail.ru

На основании математической модели технологического процесса показана возможность расчета температуры сырьевой массы в барабанных печах. Проведен сравнительный анализ экспериментальных и теоретических данных.

Неорганические и органические соединения фтора имеют большое практическое значение. Фтороводород является исходным продуктом для получения разнообразных соединений фтора с другими веществами. Наибольшее количество безводного фтороводорода расходуется в настоящее время на получение элементарного фтора, фтороуглеродов, синтетического криолита.

Промышленный способ производства безводного фтороводорода основан на разложении фторида кальция серной кислотой. Источником CaF_2 в процессе разложения является флюоритовый концентрат, содержащий более 90 мас. % CaF_2. Рассматриваемая реакция относится к классу топохимических эндотермических реакций, поэтому процесс ведется в обогреваемых вращающихся барабанных печах при 130...200 °C, куда непрерывно подаются флюоритовый концентрат и рабочая смесь кислот, состоящая из серной кислоты – 88...96 %, фтороводорода – 1...7 % и воды – 2...5 %.

Очевидно, что при управлении технологическим процессом необходимо соблюдать жесткие требования, предъявляемые как к составу и количеству сырьевого материала, представляющего собой гомогенную смесь флюоритового концентрата и рабочей смеси кислот, который загружается в барабанную печь, так и к тепловым режимам печи.

Схематическое устройство технологического аппарата показано на рис. 1.

Сырьевой материал поступает в барабанную печь через шнековый питатель. Температура в трех зонах нагрева барабанной печи поддерживается при помощи тэнов, которые могут коммутироваться как по команде оператора, так и ПЭВМ.

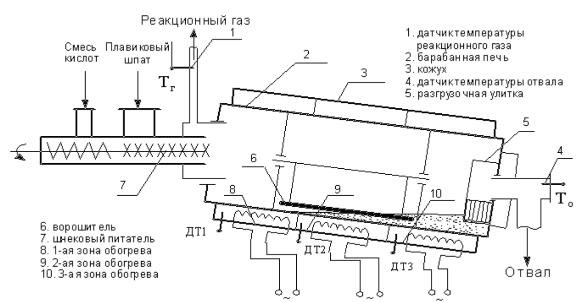


Рис. 1. *Схема технологического аппарата*

Для изучения теплового процесса во вращающейся барабанной печи и решения вопросов проектирования автоматизированной системы управления технологическим процессом разработана статическая тепловая модель, аналогичная описанной в [1, 6]. В связи с конструктивными особенностями технологического аппарата и высокой химической активностью сырья, стационарно расположить измерительные устройства внутри барабанной печи не представляется возможным, таким образом, измерение температуры сырья внутри барабанной печи не производится. Температура сырьевого материала определяется косвенно, по показаниям датчиков ДТ1, ДТ2, ДТ3 температуры воздуха в соответствующих зонах нагрева. Сложность задачи построения математической модели связана с низкой степенью корреляции между измеряемы-

ми параметрами и показателями качества технологического процесса. В статической модели происходит вычисление температуры реакционной массы в зонах обогрева без учета таких факторов, как вращение печи и движение сырья.

Допущения, принятые при создании математической модели:

- количество загруженного материала в печь на промежутке времени Δt равно количеству выгруженного;
- прогрев реакционной массы в зоне обогрева происходит равномерно;
- теплоотдача со вспомогательным технологическим оборудованием отсутствует.

Математический аппарат модели основан на уравнениях теплообмена [2, 3, 5]. Условия нагрева сырья электрическими тэнами в барабанной печи определяются сложными процессами передачи тепла.

В силу того, что тэны в рабочем режиме разогреваются до температуры 1000 °С, передача тепла излучением в процессе нагрева металлических конструкций барабанной печи будет играть решающую роль. Расчет теплового излучения основывается на законе Стефана-Больцмана. Таким образом, лучистая энергия $Q_{изл}$ поверхности тела площадью F определяется из соотношения:

$$Q_{изл} = F\varepsilon\sigma_0 T^4, \quad \text{Вт},$$

где σ_0 – постоянная Стефана-Больцмана, T – абсолютная температура черного тела, ε – степень черноты.

Между двумя поверхностями, каждая из которых находится в пределах видимости друг от друга, происходит непрерывный лучистый теплообмен. Результирующий лучистый теплообмен между двумя излучающими телами зависит от относительной интенсивности излучения и коэффициента поглощения каждого из этих тел. Если допустить, что поверхность одного тела серая, а другого тела (или окружающей среды) – черная, то тепловой поток можно выразить в виде соотношения

$$Q_{изл} = F\varepsilon_0 (T_1^4 - T_2^4), \ \text{Вт}, \tag{1}$$

где T_1 и T_2 – абсолютная температура излучающего и поглощающего тела соответственно. В формулу (1) можно ввести поправочные коэффициенты, которые учитывают форму тел, углы видимости, а также радиационные свойства поверхностей и среды, через которую происходит тепловое излучение.

Учитывая, что скорость вращения барабанной печи не превышает 2 об./мин, можно предположить, что движение воздуха вокруг печи будет иметь ламинарный характер. Таким образом, нагрев металлической конструкции печи осуществляется также конвективным теплообменом при ламинарном течении.

При оценке теплообмена между поверхностью твердого тела и омывающего ее газа, тепловой поток $Q_{конв}$ удобно описывать уравнением:

$$Q_{конв} = \alpha F \Delta T, \ \text{Вт}, \tag{2}$$

где α – коэффициент теплоотдачи; ΔT – перепад температуры между поверхностью и газом.

Выражение (2) описывает закон *теплоотдачи Ньютона*, используемый при анализе всех форм конвективного теплообмена. Для ламинарного течения газа в слое ограниченной толщины вблизи поверхности твердого тела теплопередача выражается через температурный градиент теплоносителя в непосредственной близости от поверхности:

$$Q_{конв} = -\lambda_г F\left(\frac{dT}{dn}\right), \quad \text{Вт},$$

где $\lambda_г$ – коэффициент теплопроводности газа; $\frac{dT}{dn}$ – температурный градиент в направлении нормали к поверхности твердого тела.

Коэффициент теплоотдачи α, называемый также коэффициентом теплоотдачи соприкосновением в тонком пограничном слое, может быть определён как

$$\alpha = -\frac{\lambda_ж \left(\frac{dT}{dn}\right)}{\Delta T}, \ \text{Вт/(м}^2\cdot\text{град}\cdot°\text{С)}.$$

Коэффициент теплоотдачи сложным образом зависит от геометрии поверхности, характеристик $\lambda_ж$ теплового потока, а также от физических свойств теплоносителя. Определение этого коэффициента составляет главную проблему конвективного теплообмена.

Основная задача, которая возникает при решении инженерных задач теплопередачи, стоит в том, что приходится рассматривать сочетание двух или трех основных видов теплообмена. В нашем случае тепло поступает от тэнов к барабанной печи как конвективным теплообменом, так и излучением. В это же время, печь излучает тепловую энергию во внешнюю среду и передает тепло реакционной массе. С учетом основных положений о теплообмене, изложенных в литературе [2–5], была построена функциональная схема взаимодействия основных блоков статической тепловой модели рис. 2.

Блок БЛ1 предназначен для расчета количества тепла, переданного излучением от тэнов к барабану за дискретный отсчет времени Δt. На входы блока БЛ1 подаются значения температуры тэнов $T_{ТЭН}$ и температуры $T_{ст}$ поверхности стали барабана. На основании этой информации вычисляется количество тепла, переданного излучением от тэнов к барабанной печи.

В блоке БЛ2 осуществляется расчет количества тепла, преданного барабанной печи конвективным теплообменом от омывающего её воздуха. На входы блока БЛ2 подаются данные о температуре воздуха в окрестности камеры, полученные с термопары ДТ1, и температуры $T_{ст}$ поверхности стали барабанной печи. На основании этой информации вычисляется количество тепла, переданного конвективным теплообменом. Необходимо отметить, что процесс теплопередачи может протекать и в обратную сторону,

при этом поверхность барабанной печи разогревается до температур более высоких, чем температура окружающего воздуха, и происходит передача тепла от барабанной печи окружающему воздуху.

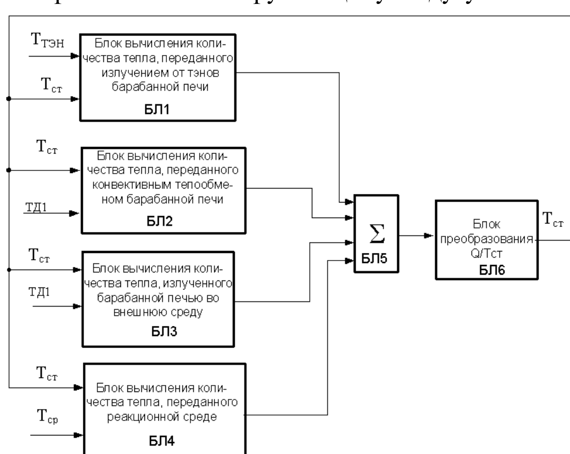


Рис. 2. *Функциональная схема статической тепловой модели*

В связи с тем, что поверхность барабанной печи разогревается до 500 °С, возникает необходимость учета тепловой энергии, рассеянной барабанной печью во внешнюю среду излучением. Для учета этого количества тепла предназначен блок БЛ3. На входы блока БЛ3 подаются значения, полученные с термопар о температуре воздуха возле камеры ДТ1 и температуры поверхности барабана $T_{ст}$. На основании этой информации вычисляется количество тепла, излученного барабанной печь и рассеянного во внешнюю среду.

Блок БЛ4 предназначен для расчета количества тепла, переданного от поверхности барабанной печи реакционной массе. На входы блока БЛ4 подаются значения температуры $T_{ср}$ реакционной массы и температуры $T_{ст}$ поверхности стали барабана. На основании этого вычисляется количество тепла, переданного реакционной массе излучением и путем контактного теплообмена, также в этом блоке рассчитывается изменение температуры реакционной массы на промежутке времени Δt.

После определения значений тепловых потоков в блоках БЛ1–БЛ4 расчетные значения суммируются. Результат суммирования поступает на блок преобразования, где по суммарному количеству тепла рассчитывается изменение $\Delta T_{ст}$ температуры поверхности барабанной печи на промежутке времени Δt.

Расчет проводится при условии, что на отрезке времени Δt все параметры технологического процесса остаются неизменными.

Для построения математической модели за основу была принята функциональная схема, представленная на рис. 2. Период времени Δt принят 30 с. Модель реализована в табличном процессоре *Excel.*

На первом этапе исследован процесс прогрева барабана в пусковом режиме при отсутствии сырья. На рис. 3 показаны результаты моделирования режима прогрева технологического аппарата.

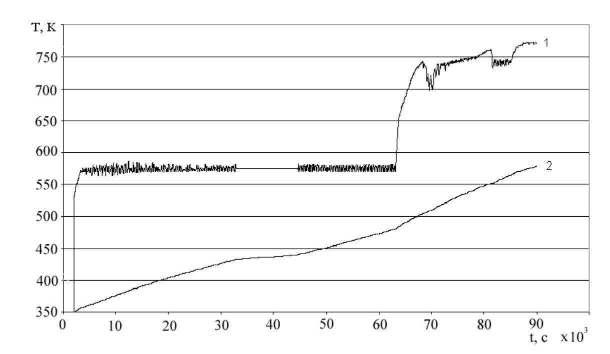


Рис. 3. *Режим прогрева технологического аппарата: 1) показания датчика ДТ1, 2) расчетные значения температуры стали барабана*

Расчетные значения температуры поверхности барабанной печи к моменту окончания прогрева соответствуют регламентной температуре технологического аппарата. Таким образом, мы можем перейти к моделированию рабочего режима барабанной печи, при котором сырьё поступает в технологический аппарат.

На следующем этапе моделирования была построена модель с сырьевым материалом. На рис. 4 показаны сравнительные результаты моделирования.

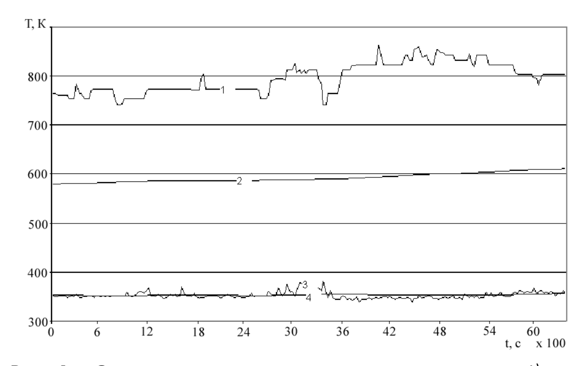


Рис. 4. *Сравнительные результаты моделирования: 1) температура с датчика ДТ1, 2) расчетные значения температуры поверхности стали барабанной печи, 3) экспериментальные и 4) расчетные значения температуры сырьевой массы 1-ой зоны*

Рассмотрим более подробно расчетную и экспериментальную зависимости температуры сырьевой массы (рис. 5).

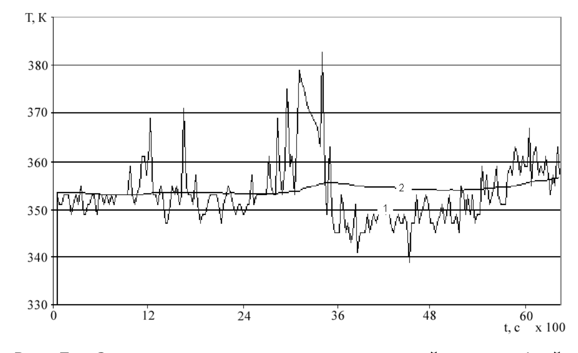


Рис. 5. *Зависимости температуры сырьевой массы в 1-ой зоне барабанной печи: 1) экспериментальные, 2) расчетные значения*

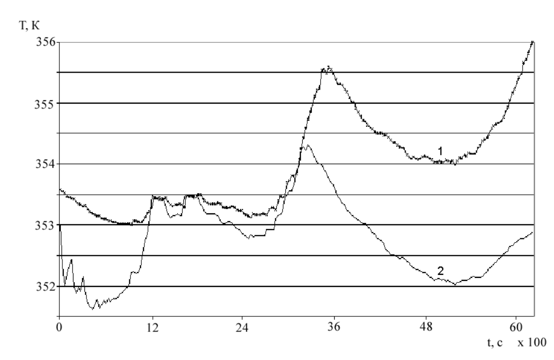


Рис. 6. *Зависимости температуры сырьевой массы в 1-ой зоне барабанной печи: 1) экспериментальные значения, пропущенные через фильтр Калмана, 2) расчетные значения*

В целях исключения нежелательных выбросов, связанных с методикой проведения эксперимента, экспериментальные данные были пропущены через фильтр Калмана. Сглаженная экспериментальная и расчетная зависимости представлены на рис. 6.

Экспериментальные и расчетные зависимости имеют расхождение не более 1 %.

Сравнительный анализ расчетных и экспериментальных данных (рис. 6) позволяет заключить о достаточно адекватной математической модели теплового процесса барабанной печи. Всё это делает возможным использовать разработанную модель теплового процесса барабанной печи для управления технологическим процессом получения безводного фтороводорода.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Калинин В.Ф., Матвейкин В.Г., Фролов С.В. Построение полной аналитической модели процесса обесфторивания фосфатов во вращающейся печи. — Тамбов: Изд-во НИИТЭХИМ, 1987. — 45 с.
2. Уонг Х. Основные формулы и данные по теплообмену для инженеров: Пер. с англ. Справочник. — М.: Атомиздат, 1979. — 216 с.
3. Теплообмен излучением: Справочник / Под ред. А.Г. Блоха, Ю.А. Журавлева, Л.Н. Рыжкова. — М.: Энергоатомиздат, 1991. — 432 с.
4. Кудинов А.А., Кудинов В.А. Теплообмен в многослойных конструкциях. Инженерные методы. — Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 1992. — 136 с.
5. Справочник по теплообменным аппаратам / Под ред. П.И. Бажана, Г.Е. Каневец, В.М. Селивестрова. — М.: Машиностроение, 1989. — 329 с.
6. Арутюнов В.А., Бухмиров В.В., Крупенников С.А. Математическое моделирование тепловой работы промышленных печей. — М.: Металлургия, 1990. — 229 с.

УДК 622.7-52 (075.8)